

Transmissão em Fibra Óptica de Sinais Radar Gerados pelo Simulador de Ameaças TS100+Excalibur

*Olympio L Coutinho, *Carla de Sousa Martins, *Felipe S. Ivo **Wilson R. Almeida, *José Edimar B. Oliveira

* Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias, CEP 12.228.900, São José dos Campos, SP – Brasil

** Instituto de Estudos Avançados – IEAv, Rod. dos Tomoios km 5,5 – Bairro Torrão de Ouro, CEP 12228-840, São José dos Campos

Resumo — Sistemas simuladores de sinais radar têm sido largamente empregados em campanhas de avaliação e testes de receptores embarcados RWR e MAGE, sendo também uma ferramenta indispensável em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e táticas de emprego na área guerra eletrônica. Com essa finalidade, a Força Aérea Brasileira adquiriu o Simulador de Ameaças TS100+ Excalibur, o qual tem sido empregado em diversas campanhas de avaliação operacional (AVAOP), ensaios de aceitação e em desenvolvimento de sistemas embarcados de guerra eletrônica, assim como em ensino e pesquisa. Este artigo apresenta o emprego de enlaces a fibra óptica em substituição aos cabos coaxiais na interligação do estágio de geração de sinais com os amplificadores. São apresentados resultados experimentais de um enlace analógico a fibra óptica com 500 m extensão. Comparações entre os sistemas de transmissão com cabo coaxial e com fibra óptica são apresentadas, baseadas em medições no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Palavras-chaves — Simulação de radar, enlace óptico analógico a fibra óptica, avaliação operacional.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas simuladores de sinais radar têm sido largamente empregados em campanhas de avaliação e testes de receptores embarcados RWR e MAGE, sendo também uma ferramenta indispensável em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e táticas de emprego na área guerra eletrônica. Com essa finalidade, a Força Aérea Brasileira adquiriu o Simulador de Ameaças TS100+ Excalibur, o qual tem sido empregado em diversas campanhas de avaliação operacional (AVAOP), ensaios de aceitação e em desenvolvimento de sistemas embarcados de guerra eletrônica, assim como em ensino e pesquisa. O TS100+ Excalibur é capaz de gerar sinais radar complexos na faixa de frequência de 0,5 a 18 GHz, possuindo um estágio de geração de sinais e quatro estágios de amplificação os quais são interconectados por cabos coaxiais que limitam em cerca de 3 metros as distâncias entre eles, limitação esta devida principalmente às elevadas perdas de potência inerentes aos cabos coaxiais nessa faixa de frequência.

Em função dessa restrição e da baixa potência radiada, é necessário posicionar todos os sistemas de geração, amplificação e antenas, assim como a equipe de operação e

de coordenação do experimento, próximos à aeronave, navio ou plataforma em avaliação, locais esses em geral sujeitos a condições climáticas adversas exigentes tanto para as equipes quanto para a operação e conservação dos equipamentos.

O estado da arte da tecnologia optoeletrônica tem propiciado a sua crescente utilização em aplicações afins em telecomunicações, notadamente em função das características de baixas perdas das fibras ópticas (da ordem de 0.2 dB/Km), ampla largura de banda de moduladores e detectores ópticos e a alta imunidade à interferência eletromagnética (EMI). Dentre essas aplicações, aquelas cujo princípio de operação fundamenta-se na interação entre sinais de radiofrequência (RF) e sinais ópticos são classificadas em uma sub-área denominada de RF-Photonics. Nessa nomenclatura, a denominação sinal de RF aplica-se para sinais com frequência compreendida entre alguns kHz e várias dezenas de GHz [1-4]. Algumas aplicações de RF-Photonics relevantes para a contextualização desta publicação são aquelas relacionadas com a transmissão, geração e processamento de sinais de microondas. Em diversos países, as referidas aplicações constituem um dos cerne da modernização de sistemas de controle e defesa do espaço aéreo, sistema radar, antenas remotas e antenas “phased array” [2-3]. Em grande proporção, a viabilização de tais aplicações decorre do desenvolvimento de componentes de alto desempenho, tais como moduladores eletroópticos, linhas de retardo com perdas independente da frequência de RF, filtros de RF com princípio de operação fotônico, defasadores de sinais de RF e distribuição de RF [2-7].

Este artigo apresenta o emprego de enlaces a fibra óptica em substituição aos cabos coaxiais na interligação do estágio de geração de sinais com os amplificadores. Por meio do emprego da transmissão dos sinais em fibra óptica, apenas os amplificadores e antenas têm que estar situados próximos à plataforma em avaliação, podendo o estágio de geração, equipes de operação e de coordenação estarem situados a distâncias de centenas de metros a quilômetros, em locais mais apropriados e ambientes climatizados. São apresentados resultados experimentais de um enlace analógico a fibra óptica de 500 m extensão. Comparações entre os sistemas de transmissão com cabo coaxial e com fibra óptica são apresentadas, baseadas em medições no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção II é apresentado de maneira sucinta o equipamento TS100+

Autores: olympio@ita.br; wilsonra@ciav.cta.br; carlasm@ita.br; edimar@ita.br.

Excalibur; na seção III é apresentada uma breve explicação do princípio de funcionamento de um enlace analógico a fibra óptica para transmissão de sinais de microondas, tendo em vista que o objetivo principal deste artigo é a demonstração do conceito de transmissão de sinais radar em fibra óptica; na seção IV são apresentados os resultados experimentais do enlace a fibra óptica implementado; e na seção V são tecidas algumas considerações e conclusões relativas ao trabalho aqui apresentado.

II. SIMULADOR DE SINAIS RADAR TS100⁺ EXCALIBUR

Desenvolvido pela empresa canadense Excalibur, o simulador de ameaças TS100⁺ é um equipamento eletrônico programável capaz de gerar sinais de radar simples e complexos, na faixa de 0,5 a 18 GHz. Sua programação permite a inclusão de uma diversidade de sinais radar com diferentes características, programação esta denominada de biblioteca de emissores. O sistema TS100⁺ Excalibur está mostrado na Fig.1. Ele é controlado por um microcomputador por meio de um software de gerenciamento denominado de Threat Builder onde são inseridas as bibliotecas de emissores e cenários de simulação. O TS100⁺ pode trabalhar em 2 modos distintos: o modo DOA e o modo radiado. O modo DOA é utilizado para simular cenários eletromagnéticos dinâmicos 2D ou 3D com plataformas emissoras ou receptoras que podem ser aéreas, navais e terrestres. Durante a simulação neste modo, são gerados os sinais dos emissores pré-programados no software Threat Builder em oito portas de saída de RF, cujas intensidades variam de acordo com a programação do diagrama de radiação das antenas das plataformas emissoras e receptoras, do tipo de varredura e da posição geográfica das plataformas definidas no cenário de simulação. O sinal gerado nessas oito portas de RF é então aplicado diretamente no front-end do receptor em avaliação, no ponto onde entraria o sinal vindo das antenas. No modo radiado, o Threat Builder permite ao operador controlar os parâmetros apenas da plataforma emissora. Os sinais programados são gerados em quatro portas de RF distintas, as quais são conectadas aos quatro amplificadores de potência e irradiados pelas respectivas antenas em direção a plataforma sob avaliação.

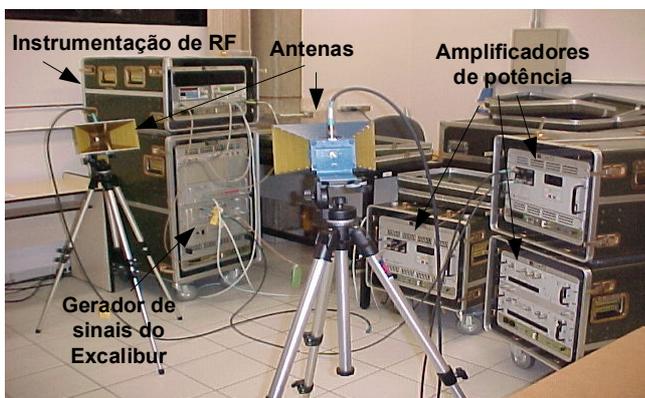


Fig. 1: Gerador de Ameaças TS-100⁺

O hardware de TS100⁺ é composto pelos seguintes subsistemas: gerador de sinais, equipamentos de medição e calibração, amplificadores de potência e antenas. O gerador de sinais é composto por placas eletrônicas de comunicação, de controle e de geração RF controladas pelo software Treat Builder capazes de alterar os parâmetros de frequência, largura de pulso, frequência de repetição de pulso e potência do sinal radiado. Os equipamentos de calibração são compostos basicamente por um freqüencímetro e um medidor de potência. Já os amplificadores estão divididos de acordo com a faixa de frequência de operação: dois amplificadores de estado sólido com potência de saída de 50 w, um operando na faixa de frequência de 0,5 a 1 GHz e outro na faixa de 1 a 2 GHz; dois amplificadores com válvula TWT com potência de saída de 70w, um operando na faixa de frequência de 2 a 8 GHz e outro na faixa de 8 a 18 GHz. Cada amplificador é conectado à sua respectiva porta de saída de RF do estágio de geração de sinais por meio de cabos coaxiais, cujos comprimentos são limitados em 3 metros. O simulador possui ainda um conjunto de 3 antenas do tipo corneta, uma para a faixa de 0,5 a 2 GHz e outras duas para a faixa de 2 a 18 GHz.

III – ENLACE ANALÓGICO A FIBRA ÓPTICA

A representação esquemática do enlace analógico a fibra óptica implementado e o arranjo experimental utilizado na sua caracterização estão mostrados na Fig. 2.

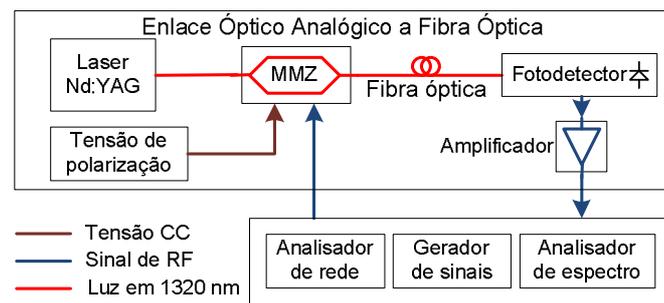


Fig. 2: Representação esquemática do enlace analógico fibra óptica e do instrumental de medição utilizado.

Em um enlace analógico a fibra óptica, a portadora óptica gerada pelo laser é modulada em amplitude pelo sinal de RF aplicado na entrada do modulador, que neste caso é um modulador interferométrico de intensidade tipo Mach-Zehnder. O sinal óptico modulado é então acoplado na fibra óptica e guiado até o fotodetector, onde o sinal de RF é recuperado e amplificado por meio de um amplificador de RF. Assim como qualquer circuito optoeletrônico ativo, um enlace analógico a fibra óptica é em geral caracterizado em função do ganho, da figura de ruído e da distorção inserida do sinal transmitido. Uma vez que o foco principal deste trabalho é a demonstração do conceito de transmissão de sinais radar em fibra óptica e apresentação de resultados experimentais, uma abordagem teórica detalhada vai além do escopo pretendido. Entretanto, o leitor pode obter esta abordagem em um trabalho recentemente publicado pelos autores deste artigo [8], onde é mostrada de forma sistemática

a formulação matemática do modelo, bem como a comprovação experimental com base no mesmo enlace aqui apresentado. O laser empregado neste setup é de tipo Nd:YAG com comprimento de onda de 1319 nm e densidade espectral de potência de ruído RIN de -165 dB/Hz. O modulador eletroóptico é de tipo Mach-Zehnder (MZM) com tensão de meia onda $V_{\pi} = 6,6$ V, faixa de frequência de operação de 0 a 10 GHz e impedância de entrada $Z_M = 50 \Omega$. A saída do MZM é acoplada a um trecho de fibra óptica monomodo com perda de 0,5 dB/km e 500m de comprimento, que por sua vez acopla luz ao fotodetector com responsividade de 2,6 A/W e impedância de saída de 50Ω , com faixa de operação até 25 GHz. O sinal fotodetector foi aplicado a um amplificador de 33 dB de ganho e largura de faixa de 0,1 a 3 GHz, com figura de ruído (NF) de 2 dB e impedância de entrada de 50Ω .

IV – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A figura 3 mostra a foto do setup experimental montado para a demonstração do conceito de transmissão dos sinais gerados pelo simulador de ameaças TS100⁺ Excalibur por meio de fibra óptica.

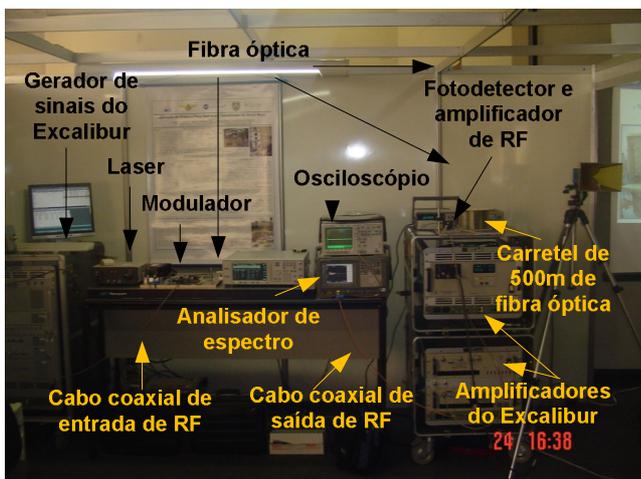


Fig. 3: Setup experimental montado para a demonstração do conceito de transmissão dos sinais radar gerados pelo simulador de ameaças TS100⁺ Excalibur por meio de fibra óptica.

As medições foram realizadas com a potência óptica média na saída do modulador igual a 8 mW e com o modulador operando no ponto de quadratura.

As medidas de ganho foram feitas com um analisador de rede varrendo a faixa de frequência de 0,3 a 3 GHz e potências de RF de 0 dBm. Com o objetivo de estimar as perdas decorrentes das eficiências de modulação e detecção ópticas, realizou-se inicialmente uma medição do ganho do enlace com a saída do modulador diretamente conectada ao fotodetector. A Fig. 4 mostra o ganho nesta situação, bem como o ganho do enlace com 500 m de fibra óptica.

Levando-se em consideração os 33 dB de ganho do amplificador de RF empregado, observa-se uma perda inicial de 33 dB em 2,9 GHz, considerando o sinal do modulador acoplado diretamente no fotodetector. Essa perda é

comparável à perda que se obtém ao utilizar um enlace de cabo coaxial com aproximadamente 130 m de extensão e perdas em torno de 0,25 dB/m.

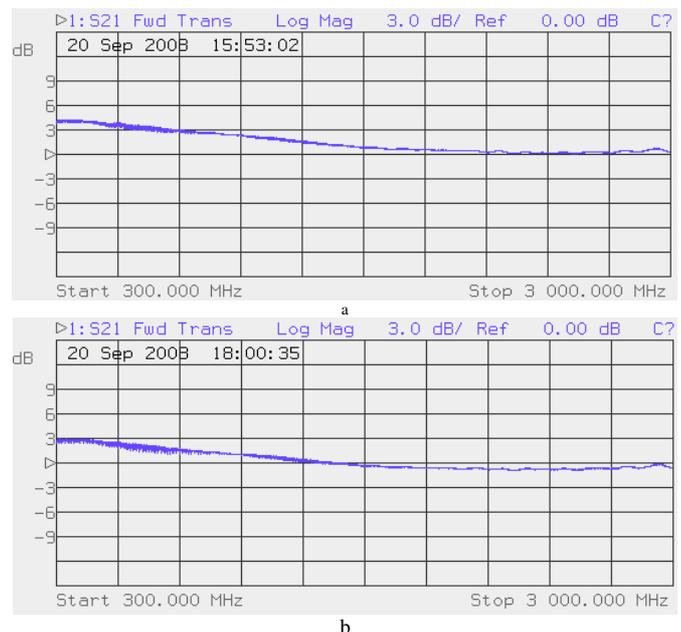


Fig. 4: Ganho do enlace: a) com o modulador conectado diretamente ao fotodetector; b) com a inserção de 500 m de fibra óptica. O MZM opera em quadratura e potência média de saída igual 8 mW. Um amplificador de RF com ganho de 33 dB foi utilizado.

Entretanto, a partir deste comprimento o enlace a fibra óptica se mostra uma opção vantajosa, ou até mandatória, como é o caso do enlace com 500 m extensão. Se um enlace com a mesma extensão fosse implementado com o cabo coaxial acima citado, as perdas seriam 125 dB, um valor expressivamente alto e impraticável se comparado com as perdas de 33,5 dB do enlace a fibra óptica. Outro fator que deve ser ressaltado é a elevada imunidade à interferência eletromagnética característica do enlace a fibra óptica, se comparada com um enlace a cabo coaxial.

O teste intermodulação de terceira ordem foi realizado com a fibra de saída do modulador conectada diretamente no fotodetector, uma vez que os efeitos de não linearidade são predominantes no modulador e no fotodetector, considerando este nível de potência na fibra óptica, e também que não houve uma variação expressiva no ganho do enlace quando foi adicionado o trecho de 500 m de fibra óptica. Em função do baixo nível de potência aplicado no amplificador, ele não foi levado em consideração na análise de distorção do enlace. Foram utilizados dois geradores de RF injetando sinais na entrada do enlace com frequências distintas de 2,85 GHz e 2,9 GHz, ambos com a mesma potência. O sinal espúrio devido à intermodulação de terceira ordem está mostrado na Fig. 5, relativo a uma potência de entrada de 0 dBm.

O teste final para a demonstração do conceito foi realizado com o TS100⁺ ligado ao enlace a fibra óptica. Neste teste, um radar com frequência de repetição de pulso de 1 kHz, largura de pulso de 1 μ s e frequência de portadora de 2,8 GHz foi programado no simulador de ameaça. A potência de pico na saída do gerador foi de 0 dBm. Para efeito de comparação da

degradação do sinal produzida pelo enlace a fibra óptica, foram realizadas medidas tanto na saída do estágio de geração de sinal como na saída do enlace. Na Fig. 6 são apresentados no domínio da frequência o sinal de saída na porta de RF do gerador do TS100⁺, o qual é aplicado na entrada do enlace a fibra óptica, bem como o sinal na saída do enlace a fibra óptica. Na Fig. 7 são apresentados no domínio do tempo o sinal de saída na porta de RF do gerador do TS100⁺ e o sinal presente na saída do enlace a fibra óptica.

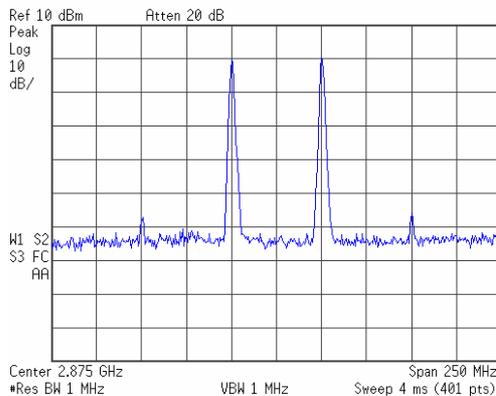


Fig. 5: Sinais espúrios devidos à intermodulação de terceira ordem resultantes da aplicação de um sinal de 2,85 GHz e outro de 2,9 GHz, ambos com potência de 0 dBm, com 8 mW de potência média óptica na saída modulador operando no ponto de quadratura e um amplificador com ganho de 33 dB.

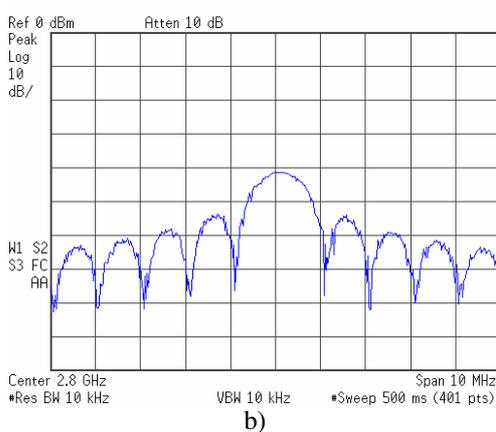
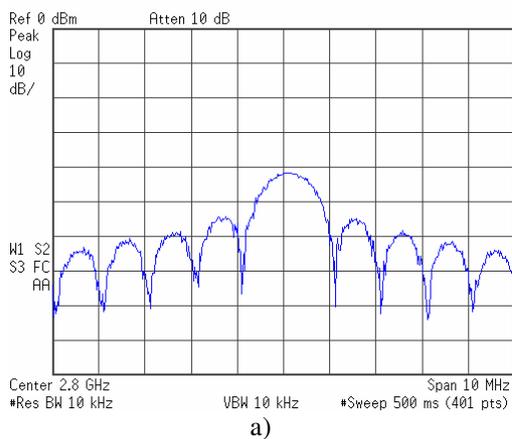
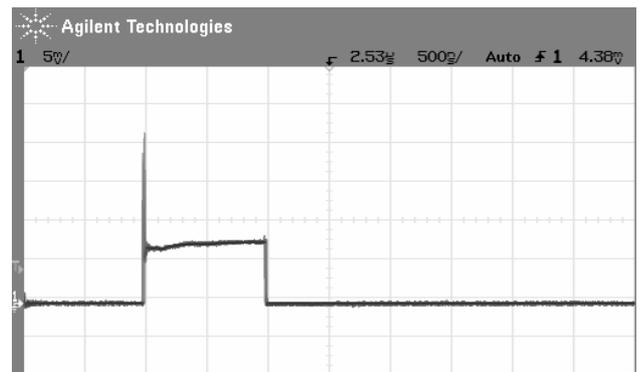
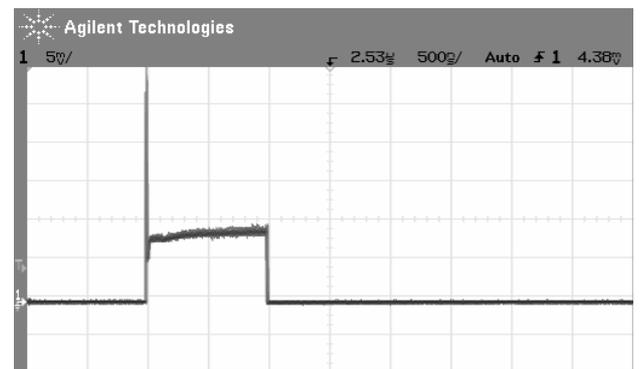


Fig. 6: a) Sinal de saída na porta de RF do gerador do TS100+ Excalibur, o qual é aplicado na entrada do enlace a fibra óptica; b) o sinal na saída do enlace a fibra óptica, ambos no domínio da frequência.



a)



b)

Fig. 7: a) Sinal de saída na porta de RF do gerador do TS100+ Excalibur, o qual é aplicado na entrada do enlace a fibra óptica; b) o sinal na saída do enlace a fibra óptica, ambos no domínio do tempo.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o conceito de transmissão de sinais radar por meio de enlace a fibra óptica, gerados a partir do simulador de ameaças TS100⁺ Excalibur. Os resultados experimentais apresentados comprovam as vantagens do emprego de enlace a fibra óptica para a transmissão de sinais radar em médias distâncias. No caso do enlace implementado, estas vantagens começam a ser significativas em relação ao cabo coaxial considerado a partir de superiores a 130 m. Entretanto, o desempenho do enlace pode ser melhorado significativamente por meio da utilização de um modulador com tensão V_{π} menor e um fotodetector com responsividade maior do que a empregada nesse trabalho. Considerando componentes disponíveis comercialmente, como moduladores com tensão V_{π} em torno de 3 volts e fotodetectores com responsividade de até 0.9 A/W, o ganho de RF para o enlace de comprimento zero pode ser melhorado por um fator em torno de 20 dB. Neste caso, a melhoria total obtida no ganho equivaleria a uma distância de em torno de 80 m de cabo coaxial na frequência de 3 GHz. Desta forma, o emprego de enlace a fibra já seria vantajoso a partir de 50 m de distância. Aumentando a frequência de transmissão, esta distância se torna ainda melhor. A faixa de

frequência do enlace implementado está limitada em 3 GHz em função da resposta do amplificador. Entretanto o estado da arte da tecnologia de RF-Photonics permite que ela seja estendida para a faixa de 18 GHz, ou até mesmo para várias dezenas de GHz.

REFERÊNCIAS

- [1] A.J. Seeds and K.J. Williams, "Microwave Photonics", *Journal of Lightwave Thechnology*, vol. 24, no 12, pp. 4628-4641, December 2006.
- [2] K. Garenaux, T. Merlet, C. Fourdin, and J. Chazelas, "Recent Breakthroughs in Photonics for Radar Systems", *IEEE A&E Systems Magazine*, pp. 3 – 8, February 2007.
- [3] Y. C. Hung, B. Bortnik and H. R. Fetterman "Dynamic - Range Enhancement and Linearization in Electrooptically Modulated Coherent Optical Links", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, NO. 11, pp. 3289 – 3300, November 2007.
- [4] C. H. Cox III, I. Ackerman, G. E. Betts and J. L. Prince, " Limits on the Performance of RF – Over – Fibers Links and Their Impact on Device Design", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, NO 2, pp. 906 – 920, February 2006.
- [5] A.S. Daryoush, "Microwave Photonics in Dual-Use Military Systems – A Personal Perspective", *RTO Series on Optics Microwave Interactions*, Setembro 2002, published in RTO-EN-028.
- [6] H. Zmuda and E.N Toughlian "Photonic Aspects of Modern Radar", Artech House, 1994.
- [7] W.S.C. Chang "RF Photonic Technology in Optical Fiber Links", Cambridge University Press, 2002.
- [8] O.L. Coutinho, C.S. Martins, V.R. Almeida, J.E.B. Oliveira, "Aplicação de Enlace a Fibra Óptica em Transmissão de Sinais Radar", *Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, MOMAG2008*, Florianópolis, SC, Setembro de 2008.